

多重フレネル反射抑制によるプラスチック光ファイバ中の ブリルアン利得スペクトル観測の長期安定性向上

Long-term stability enhancement of Brillouin gain spectrum measurement in plastic optical fibers by mitigating multiple Fresnel reflections

東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 ○松谷 夏樹、李 熙永、水野 洋輔、中村 健太郎
FIRST, IIR, Tokyo Tech ○Natsuki Matsutani, Heeyoung Lee, Yosuke Mizuno, and Kentaro Nakamura
E-mail: nmatsutani@sonic.pi.titech.ac.jp

1. はじめに

光ファイバ中のブリルアン散乱に基づく歪・温度センサは、周波数情報によって高精度に歪・温度の分布を測定できるため、構造物ヘルスマonitoring分野での応用が期待されている。従来、そのセンサヘッド（被測定光ファイバ（FUT））は専らガラス光ファイバで構成されていた[1]。しかし、ガラス光ファイバは数%の歪を印加しただけで破断してしまう。この問題を解決するため、我々は、柔軟性に富むプラスチック光ファイバ（POF）を用いたブリルアンセンサに注目している。特に、POFの片端から光を入射するだけで動作するブリルアン光相関領域リフレクトメトリ（BOCDR）と呼ばれる分布型歪・温度測定技術の開発を推進している[2, 3]。

POF（コアの屈折率 $n=1.35$ ）を用いたBOCDRでは、POFの両端（シリカ単一モード光ファイバ（SMF; $n=1.46$ ）および空気（ $n=1.00$ ）との境界）でのフレネル反射光が強い場合、それらの時間的に不安定な干渉ノイズがブリルアン利得スペクトル（BGS）に重畳する[4]。その結果、歪や温度値を与えるブリルアン周波数シフト（BFS）の測定精度が低下してしまう（特に高速測定において顕著[3]）。FUTがシリカSMFの場合は、手前の端面での反射は小さい上、開放端付近に極めて大きい曲げ損失を印加することで、開放端からのフレネル反射も十分に低減できる。しかし、FUTがPOFの場合は、50 μm のコア径を有する多モード光ファイバであるため曲げに極めて強く[5]、開放端付近に十分に大きい損失を印加することは困難である。従来は、屈折率が近い水（ $n=1.33$ ）に浸漬することでPOFの開放端でのフレネル反射を抑制していた。しかし、水から取り出した場合、高パワーの光に晒される開放端では水は比較的短時間で蒸発してしまうため、安定した計測のためには開放端を常に浸漬しておく必要があった。

そこで本発表では、POFのコア材料であるアモルファスフッ素樹脂（CYTOP®）（専用のフッ素溶媒に溶かした状態）にPOFの開放端を浸漬する手法を提案する。CYTOP溶液の粘性が高いため、取り出した後も溶液が開放端に付着しやすい。また、溶媒が蒸発してもCYTOP自体は開放端に残留するため、フレネル反射低減の効果が永続する。さらに、コア材料と同一物質であるため、水を用いた場合よりも理想的な屈折率整合が実現できる。まず、本手法により、フレネル反射光のパワーの不安定性（時間的な揺らぎ）が、開放時と比較して大幅に改善されることを示す。さらに、溶媒の蒸発後もBGS観測において、多重フレネル反射に起因する干渉ノイズを低減するのに有用であることを示す。

2. 実験

長さ2.6mの全フッ素化POFを用いた。実験系をFig.1に示す。まず、1550 nm帯の半導体レーザの出力を、シリカSMFを通じ、POFに入射した。入射光パワーは、エルビウム添加光ファイバ増幅器を用いて23.5 dBmに固定した。次に、フォトディテクタとオシロスコープを用いて、POFからの反射光パワーをリアルタイムに観測した。ここで、偏波変動は偏波スクランブラにより抑制した。反射光パワーの測定は、POFの末端を開放した場合、および、水あるいはCYTOP溶液に浸漬してから取り出した場合と比較した。

POFの開放端をCYTOP溶液に浸漬しないとき、および、浸漬したときのフレネル反射パワーの時間変化をFig.2に示す。どちらの場合も時間的に不規則であったが、その変動幅の標準偏差は0.5 dB（浸漬なし）、0.1 dB（浸漬あり）であり、約4倍の差があった。CYTOP溶液に浸漬しない場合は、フレネル反射パワーが比較的大きくなる瞬間があり、そのときに干渉ノイズも大きくなるものと考えられる。

最後に、溶媒が蒸発した後に残留したCYTOPの有無がPOF全長のBGS観測に与える影響を調査したのがFig.3である。平均回数は2回とした。残留したCYTOPがない場合、BGSにノイズが重畳し、BFSの高精度の算出は困難であった。このノイズは、POF両端での多重フレネル反射に起因している（ピーク間隔（約40 MHz）がPOF長に基づく計算値と一致したため）。一方、残留したCYTOPがある場合は、ノイズが抑制され、BFS算出の精度が向上した。また、ここでは詳細は省くが、水への浸漬後に取り出した場合との比較も行い、CYTOPの長期測定における有用性を示した。

以上より、本手法は、POFを用いたBOCDRにおいて、標準的なフレネル反射低減手法となると期待される。

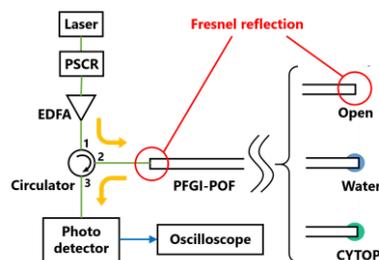


Fig. 1. Experimental setup. EDFA: erbium-doped fiber amplifier; PSCR: polarization scrambler.

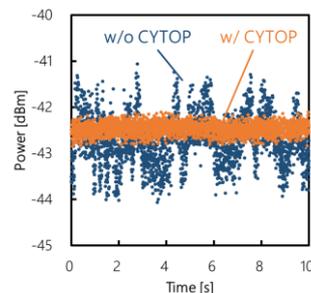


Fig. 2. Temporal variations of reflected light power.

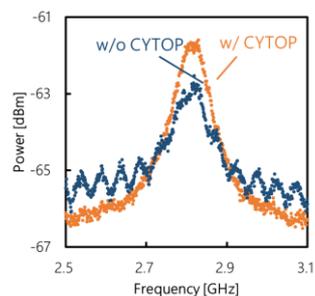


Fig. 3. BGS measured with and without CYTOP.

参考文献

- [1] T. Horiguchi et al., *IEEE Photon. Technol. Lett.* **1**, 107 (1989).
- [2] Y. Mizuno et al., *Opt. Express* **16**, 12148 (2008).
- [3] H. Lee et al., *Photon. J.* **8**, 6802807 (2016)
- [4] Y. Mizuno et al., *J. Lightwave Technol.* **32**, 4132 (2014).
- [5] Y. Koike et al., *NPG Asia Mater.* **1**, 22 (2009).